

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ НАЗЕМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРОЖИДКОСТНЫХ ИНЖЕКТОРОВ

Гишваров А.С., Курунов Ю.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Рассматривается принципиальная схема энергетической установки (привода электрического генератора), выполненной на основе конвертированного авиационного газотурбинного двигателя со свободной турбиной, в которой с целью повышения эффективности использования установки утилизируется тепло, с применением парожидкостных инжекторов (см.рис.).

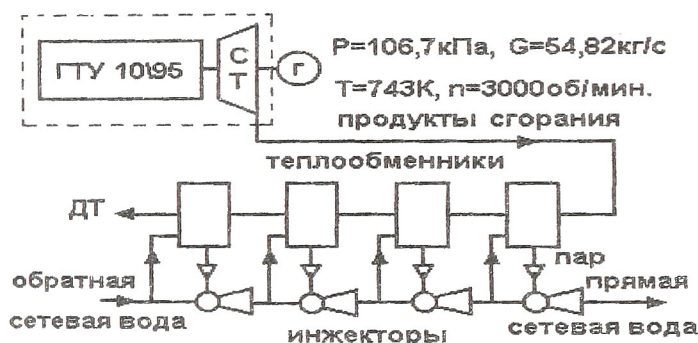


Рисунок - Принципиальная схема утилизации тепла энергетической установки с применением парожидкостных инжекторов.

Парожидкостные инжекторы в настоящее время являются наилучшими по всем параметрам энерго- и средствеосбережения устройствами в системах теплоснабжения жилых и производственных помещений. При этом:

- сокращается потребление газа в 2 раза;
- затраты на прокачку теплоносителя становятся нулевыми;
- снижаются затраты на приобретение основного оборудования (теплообменников, насосов, помещений и т.д.);
- сокращаются площади для размещения оборудования;
- снижаются затраты на ремонт оборудования ввиду отсутствия в инжекторах каких-либо подвижных или вращающихся деталей.

В зависимости от места размещения источника электроэнергии такая установка может быть использована:

-в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения вместо пароводяных подогревателей и сетевых насосов с сохранением параметров этих систем;

-в качестве осушительных насосов; для мытья подвижного состава, цистерн, оборудования, цехов; проведения гидравлических испытаний емкостей и систем; для транспортировки обычных и химически загрязненных жидкостей;

-в качестве дозатора, гомогенизатора, стерилизатора в молочной, фармацевтической и химической промышленности.

В рассматриваемой работе принцип работы установки совместно с инжектором следующий. За соплом двигателя устанавливается пароводо-воздушный теплообменник, на вход которого подается часть холодной воды под определенным давлением, например, обратная вода из системы водоснабжения жилых и производственных помещений. Проходя через теплообменник, вода превращается в пар, который далее подается на вход в парожидкостный инжектор. Другая часть воды подается раздельно во второй вход инжектора.

В парожидкостном инжекторе происходит ускорение потока охлаждающей жидкости паровым потоком, причем таким образом, что давление торможения смеси превышает давление торможения потоков пара и жидкости на входе в инжектор. В паровое сопло, в котором потенциальная энергия пара преобразуется в кинетическую, поступает пар с предельной степенью сухости. Влажный пар из сопла направляется в камеру смешения, где происходит обмен импульсами с охлаждающей жидкостью, вытекающей из жидкостного сопла, и конденсация основной части пара. В конце камеры смешения, когда паровая фаза практически сконденсирована, структура потока перестраивается: среда становится пузырьковой или пенной. При этом скорость распространения малых возмущений резко снижается и при умеренных абсолютных скоростях течение оказывается сверхзвуковым. На выходе из камеры смешения (при входе в диффузор) возникает скачок уплотнения конденсации, в котором завершается конденсация паровой фазы, и далее в диффузоре кинетическая энергия потока несжимаемой жидкости превращается в потенциальную. Наличие скачка уплотнения конденсации является особенностью парожидкостного инжектора. Положение скачка и его интенсивность изменяются в зависимости от режимных параметров инжектора.

Возможно применение нескольких схем двухфазных инжекторов:

- с центральным подводом пара (А),
- с центральным подводом жидкой фазы (Б),
- с распределенным подводом жидкости при периферийном или центральном подводе пара (В).

Инжекторы с периферийным паровым соплом обладают большей эффективностью за счет лучшей организации потока и снижении потерь в

камере смешения. В схеме (А) подвод жидкости осуществляется через отдельные сопла (А1) или целевое сопло (А2). Схема (А2) пригодна для больших расходов воды. Если расходы малы, то потери в жидкостном сопле возрастают и в этом случае целесообразно применение схем (А) и (Б). В схеме (А1) жидкость подается через центральное сопло, укрепленное на специальных пилонах, что уменьшает нагрев жидкости перед камерой смешения по сравнению со схемой (В).

В камере смешения осуществляется дробление и разгон частиц жидкой фазы, а также почти полная конденсация паровой фазы, что приводит к перестройке структуры потока. На выходном участке поток имеет пузырьковую или пенную структуру, причем скорость потока, как правило, превышает скорость звука.

Положение скачка зависит от противодавления: с его увеличением скачок перемещается против потока. При максимальном противодавлении скачок находится вблизи горла диффузора и может перемещаться в камеру смешения.

Расчет инжектора проводят в предположении, что:

- давление в камере смешения до скачка уплотнения постоянно;
- максимальному противодавлению соответствует положение скачка во входном сечении диффузора;
- распределения скоростей и давлений в характерных сечениях аппарата являются равномерными.

В паровом и жидкостном соплах давление падает, в камере смешения оно вначале уменьшается и далее слабо растет вплоть до входного сечения в диффузор. Здесь давление в скачке резко возрастает, его рост продолжается и за скачком в диффузоре. Степень повышения давления в аппарате зависит от его геометрических и режимных параметров.

Максимальное давление на выходе из инжектора определяется по формуле:

$$P_{\text{вых}}^{\text{max}} = \frac{(m_{\text{п}} c_{\text{п}} + m_{\text{ж}} c_{\text{ж}})^2 P_{\text{ж}}}{2(m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}) \left(\frac{2}{\psi - \eta_{\text{д}}} \right)} + P_{\text{к}},$$

где $m_{\text{п}}$, $m_{\text{ж}}$ - секундные массы пара и жидкости; $c_{\text{п}}$, $c_{\text{ж}}$ - скорость течения пара и жидкости; $P_{\text{ж}}$, $P_{\text{к}}$ - статические давления жидкости и пара на входе в камеру смешения; ψ - коэффициент скорости смешения; $\eta_{\text{д}}$ - КПД диффузора инжектора.

Внутренний КПД инжектора определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{m_{\Pi}(p_{2Д} - p_{0\Pi}) + m_{Ж}(p_{2Д} - p_{0Ж})}{\rho_{Ж} m_{\Pi} \Delta H_0},$$

где $P_{0\Pi}$, $P_{0Ж}$ – давление торможения пара и охлаждающей жидкости перед соплами; $P_{2Д}$ – давление жидкости за диффузором; ΔH_0 – располагаемый перепад энтальпий парового потока.

Учитывая, что

$$p_{0Ж} = p_{1Ж} + \frac{\rho_{Ж} c_{Ж}^2}{2\eta_{сж}},$$

где $P_{1Ж}$ – статическое давление на срезе жидкостного сопла; $\eta_{сж}=1-\zeta_{сж}$ – КПД жидкостного сопла; $\zeta_{сж}$ – коэффициент потерь в жидкостном сопле. Тогда

$$\eta_i = \eta_{с.п} \left[\frac{(1+u\chi)^2}{\left(\frac{2}{\varphi} - \eta_{Д}\right)(1+u)} - \frac{u\chi^2}{\eta_{с.ж}} \right],$$

где $u=m_2/m_1$ – коэффициент инжекции; $\eta_{с.п}=1-\zeta_{с.п}$ – КПД парового сопла; $\zeta_{с.п}$ – коэффициент потерь в сопле; $\chi=c_{п}/c_{ж}$.

Эффективность инжектора зависит от начальной степени сухости парового потока x_0 . Этот параметр определяет потери в камере смешения (возрастают с увеличением x_0), потери в паровом сопле (снижаются с увеличением x_0), а также термодинамические потери цикла (растут с уменьшением x_0).

Существует оптимальная степень сухости. Повышение КПД инжектора осуществляется за счет оптимизации режимных параметров:

- относительной скорости жидкости (χ),
- потерь в скачке $\zeta_{с.п}$
- относительных температур охлаждающей жидкости (τ_1) и пара (τ_2),
- коэффициента инжекции u .

В условиях эксплуатации могут меняться все режимные, и геометрические параметры инжектора. К первым относятся безразмерные параметры:

относительное полное давление за инжектором $P'_{o2} = P_{o2}/P_{o\Pi}$ или $P''_{o2} = P_{o2}/P_{oЖ}$;

относительное давление жидкости перед инжектором $P'_{ож} = P_{ож}/P_{оп}$;

- коэффициент инжекции $\mu = m_{ж}/m_{п}$;
- отношение температур фаз τ_1 ;
- степень сухости на входе x_0 .

В эксплуатации могут меняться:

- относительная площадь горла диффузора $F'_*д = F_*д/F_{п.с}$;
- относительная площадь выходного сечения жидкостного сопла $F'_{жс} = F_{жс}/F_{п.с}$;
- относительная длина камеры смешения $l'_{к.с} = l_{к.с}/d_*д$ и другие параметры.

Существуют предельные режимы работы инжектора. При уменьшении коэффициента инжекции, т. е. расхода охлаждающей жидкости, может наступить режим «запаривания» — расход жидкости оказывается недостаточным для полной конденсации пара. При чрезмерном увеличении расхода жидкости обнаруживается режим «захлебывания» инжектора — импульс потока пара в этом случае недостаточен для того, чтобы пропустить через горло диффузора расход смеси, образующейся в камере смешения. С ростом $P'_{оп}$ диапазон режимов по коэффициентам инжекции при фиксированных геометрических параметрах резко сужается. Уменьшение начальной степени сухости

Для эксплуатации важным является режим запуска инжектора. Паровое сопло находится на нерасчетном режиме при повышенном давлении в камере смешения. В нем возникает система скачков уплотнения; конденсационный скачок располагается в камере смешения, где и завершается процесс конденсации. При этом в горловину диффузора поступает жидкость. Скачок конденсации перемещается в камере смешения и вызывает интенсивную давления и расходов жидкости и пара.

Запуск инжектора включает два этапа:

- запуск парового сопла;
- запуск камеры смешения.

В результате осуществления первого этапа паровое сопло начинает работать на режиме, близком к расчетному; после второго этапа скачок уплотнения-конденсации перемещается из камеры смешения за горловину диффузора.

Применяются различные способы запуска инжектора:

- путем изменения начальных параметров пара и жидкости ($P_{оп}$, $T_{оп}$, x_0 , $P_{ож}$, $T_{ож}$) и коэффициента инжекции μ . Запуск происходит при пониженных расходах $m_{п}$ и $m_{ж}$, так как уменьшение расхода кроме прямого влияния на режим течения приводит также и к нарушению изобар-

ности процесса смешения, т. е. к росту давления на выходе из камеры смешения и к увеличению плотности пара. В результате уменьшается необходимая площадь горла диффузора.

- путем изменения геометрических параметров, в частности, $F'_{*д}$, i_k , $F_{*п.с}$, $F_{ж.с}$ или путем организации перепусков и сбросов части рабочего тела, организуемых по длине камеры смешения.

Основной геометрический параметр инжектора $F'_{*д}$ можно в процессе запуска изменять различными способами и, в частности, с помощью регулирующей иглы (центрального тела), перемещающейся по оси аппарата. Наиболее перспективными являются комбинированные методы, применение которых обеспечивает запуск инжектора с размером горла диффузора, близким к оптимальному. Из условия максимального давления за инжектором $P_{2д} = P_{2д, макс}$ необходимая для запуска площадь горла определяется по формуле:

$$F_{*д}^{онт} = \frac{m_{п}(1 + u)^2(2 - \eta_{д})}{c_{п}\rho_{ж}(1 + u_{сж}/c_{п})}.$$

Действительная площадь горла должна быть существенно больше, т. е. $F_{*д} \gg F_{*д}^{онт}$. Инжектор работает устойчиво в широком диапазоне ре-

жимных параметров и даже резкое изменение мощности парогенератора в 1,5—2 раза или значительное изменение давления на выходе или в расширительном баке контура не приводят к срыву работы инжектора.

Дальнейшее повышение давления воды, вытекающей из инжектора, обеспечивается за счет второго парожидкостного инжектора (число инжекторов зависит от потребного давления и параметров газа на выходе из сопла энергетической установки), при этом одна часть воды подается на вход во второй инжектор, а другая - в теплообменник, где преобразуется в пар и подается отдельно на вход второго инжектора. Таким образом, обеспечивается ступенчатое увеличение давления в системе.

Рассматриваемая схема утилизации тепла энергетической установки предлагается к применению для ГТУ-10/95 мощностью 4,5...12 МВт с параметрами газа за свободной турбиной:

- давление $P=106,7$ кПа;
- температура $T=743$ К;
- расход $G=54,82$ кг/с.